



Association
de Science Régionale
de Langue Française

48^{ème}
colloque

ASRDLF 2011
6, 7 et 8 Juillet, Schoelcher - Martinique

Migrations et Territoires



<http://asrdlf2011.com/>

LA MODELISATION SPATIALE DU BASSIN D'APPROVISIONNEMENT EN BOIS-ENERGIE DE BAMAKO (MALI) : QUAND LA FOIRE PREND LE PAS SUR LA DISTANCE

Laurent GAZULL*, Denis GAUTIER*, Gwenaëlle RATON**

* CIRAD, Campus international de Baillarguet, TA C-105 /D, 34398 Montpellier Cedex 5, France.

Tel : 33 4 67 59 37 25, Fax 33 4 67 59 37 33.

emails : laurent.gazull@cirad.fr , denis.gautier@cirad.fr

** Univ. Paris I, Laboratoire PRODIG, 75005, Paris, France

email : gwenraton@hotmail.com

Résumé

Au Sahel, le bois-énergie, sous une forme brute ou sous forme de charbon, est la première source énergétique des populations rurales et urbaines. La demande croissante des grandes villes fait peser sur les ressources forestières avoisinantes une pression de plus en plus forte, pouvant remettre en cause leur durabilité. Dans ce contexte, la question de l'organisation spatiale des bassins d'approvisionnement des villes sahéliennes, est un enjeu majeur pour la définition de politiques de gestion à long terme des ressources ligneuses.

La modélisation spatiale de l'aire d'approvisionnement de Bamako (Mali), utilisée comme un processus heuristique, permet de mettre en évidence les déterminants de la localisation et de l'intensité des prélèvements. Il apparaît que le facteur principal d'explication des flux de bois réside dans l'organisation des ventes de bois en milieu rural. La présence d'une foire hebdomadaire ou d'un marché rural du bois-énergie est un facteur d'attractivité plus important que la distance à Bamako. Cette caractéristique de l'échange est négligée dans la plupart des modèles de localisation existants qui, en majorité, s'attachent au seul coût du transport. Les résultats mettent en évidence que les logiques de l'échange et que les relations entre groupes sociaux prennent le pas sur les coûts de déplacement.

Mots-clés

bois-énergie, filière, interaction spatiale, modèle gravitaire, bassin d'approvisionnement

Introduction

Le bois rentre pour plus de 90 % dans la satisfaction des besoins énergétiques des populations du Sahel et cette position dominante évolue peu depuis plus de 50 ans.

Qu'elle soit une menace pour l'environnement ou un facteur potentiel de développement, il n'en reste pas moins que la demande en bois-énergie représente une pression importante sur les ressources forestières des pays sahéliens et pose la question de leur durabilité. Cette pression se concentre dans les zones périurbaines où se sont développées de véritables aires de chalandise dans lesquelles les ressources forestières sont extraites des campagnes pour approvisionner les centres urbains (Buttoud, 2001). Dans ce contexte, la question de l'organisation spatiale des bassins d'approvisionnement des villes sahéliennes, est un enjeu majeur pour la définition de politiques de gestion à long terme des ressources ligneuses.

Pour de nombreux auteurs, la ville exerce une force sur les ressources boisées avoisinantes directement proportionnelle à la population urbaine et inversement proportionnelle au coût de la distance : la pression sur la ressource est d'autant plus forte que l'on est proche du centre urbain, ce qui donne au bassin d'approvisionnement une forme en anneaux concentriques (Chomitz et Griffiths, 1997 ; Cline-Cole *et al.*, 1990 ; ESMAP, 2001). Or cette vision orthodoxe est mise en défaut par de nombreuses observations: des différences significatives de pratiques s'observent entre les villages situés au sein d'une même couronne; certaines villes comme Kano au Nigeria démontrent même un effet inverse - la pression est d'autant plus forte que l'on est éloigné du centre (Cline-Cole *et al.*, 1987). Ces déviations par rapport au modèle s'expliquent par les types de contrôles exercés sur l'accès à la ressource, par le poids des dynamiques agricoles qui créent des forces de résistance à la demande urbaine (Cline-Cole *et al.*, 1990; Ribot, 1990), mais également par le type d'organisation de la chaîne de collecte.

Le bassin d'approvisionnement est un objet géographique complexe qui peut se limiter à la simple zone drainée de manière concentrique par la demande urbaine. En effet, l'approvisionnement des villes est actuellement le fait d'un réseau d'échanges entre de nombreux acteurs intermédiaires aux fonctions, aux comportements et aux localisations diverses. Tout comme dans le domaine agricole, où l'arrivée des firmes agroalimentaires et des coopératives bouleverse le schéma concentrique de von Thünen (Daniel, 2001), le développement économique de la filière bois-énergie nous invite à réfléchir sur le poids de l'organisation économique des échanges sur l'organisation spatiale de l'aire de marché et à proposer de nouveaux modèles.

L'objectif de cette communication est de présenter un modèle d'interaction spatiale permettant de prédire la localisation de l'exploitation du bois de feu autour d'une grande ville du Mali : Bamako et d'en mesurer l'intensité. La modélisation spatiale est utilisée ici comme un processus heuristique, permettant de mettre en évidence les déterminants de la localisation et de l'intensité des prélèvements. L'originalité du modèle réside à la fois dans la démarche de construction et dans les résultats obtenus. La démarche de modélisation retenue vise à replacer l'individu dans son rôle économique, et donc dans une logique de groupe social aux fonctions déterminées dans une chaîne d'approvisionnement, ainsi que dans un ensemble de formes spatiales (lieux et réseaux) qui définissent sa position et sa mobilité.

1. Démarche et données retenues

1.1. Démarche générale

La question de la localisation de l'exploitation forestière est abordée au travers de celle de la modélisation spatiale des flux de bois-énergie alimentant la ville. En effet, les flux permettent de par leur nature, de renseigner à la fois la localisation (au travers de l'origine et de la destination), et l'intensité du prélèvement (au travers des quantités prélevées par unité de temps). Le modèle de prédiction choisi est un modèle d'interaction spatiale de type gravitaire, de niveau meso-géographique, élaboré néanmoins selon une approche comportementale micro-géographique. En effet, le rapprochement des deux approches individu-centrées et meso-géographique apparaît aujourd'hui comme une nécessité (Holm et Sanders, 2001) : dans un sens, pour intégrer des règles de fonctionnement à des niveaux supérieurs dans les modèles de microsimulation et dans l'autre sens, pour prendre en compte la diversité des décisions individuelles dans les modèles d'interaction spatiale.

La démarche retenue est hypothético-déductive. Elle repose sur cinq grandes étapes :

1. le choix des acteurs clés de la filière et l'analyse de leurs préférences spatiales;
2. le choix des entités spatiales en interaction ;
3. le choix des attributs spatiaux et non spatiaux des entités spatiales ;
4. le choix d'une métrique de la distance ;
5. la formalisation et la validation du modèle gravitaire.

L'analyse première des préférences spatiales a pour objectif de comprendre les déterminants du choix et les comportements spatiaux des acteurs, afin de traduire ces préférences en facteurs de choix évaluables : quelles sont les propriétés de l'environnement et en particulier celles des lieux et de leur agencement, qui conditionnent les stratégies spatiales de ces acteurs ? Pour ce faire, nous avons cherché à caractériser les comportements spatiaux et non spatiaux des différents acteurs par la combinaison de deux approches :

- la première, par le recueil des préférences déclarées des acteurs au travers d'enquêtes spécifiques auprès des commerçants et d'entretiens libres auprès des producteurs et de l'administration forestière. La méthode a consisté à faire exprimer par les acteurs quelles étaient leurs priorités d'action et quels étaient les éléments qui déterminaient leurs choix ;
- la seconde, par une observation directe des comportements d'acteurs sur le terrain et dans le cadre d'un jeu de rôle simulant le fonctionnement du bassin d'approvisionnement. Ce jeu de rôle, appelé Djolibois (Gazull *et al.*, 2010), mis en place et joué avec les acteurs de la filière, a permis de valider les préférences déclarées et de révéler de nouvelles stratégies spatiales.

A partir de cette analyse, une seconde étape a consisté à définir les entités spatiales à modéliser en fonction de leur pertinence par rapport à la localisation des acteurs, aux stratégies révélées et aux données disponibles.

Dans une troisième étape, nous avons retenu les attributs de ces lieux, les plus pertinents au regard des préférences des acteurs. Puis, la distance étant un facteur privilégié dans tout modèle gravitaire, une réflexion a été menée sur la meilleure métrique à retenir pour mesurer l'éloignement des sites de production et de la ville.

Finalement, nous avons formalisé un modèle d'interaction spatiale permettant de prédire les flux, qui a été confrontée à la réalité des flux observés.

1.2. Les données utilisées

Les données de flux utilisées proviennent d'une enquête de trafic spécifiquement menée en janvier 2000 par le projet « Stratégie Energie Domestique » et par la Direction Nationale des Eaux et Forêts afin de comptabiliser les véhicules entrant dans Bamako et transportant du bois ou du charbon de bois. Cette enquête de type « origine-destination » recense les véhicules de manière exhaustive, sur l'ensemble des 17 axes routiers, sur une durée de 7 jours consécutifs (24h/24), et renseigne sur l'origine du bois de feu.

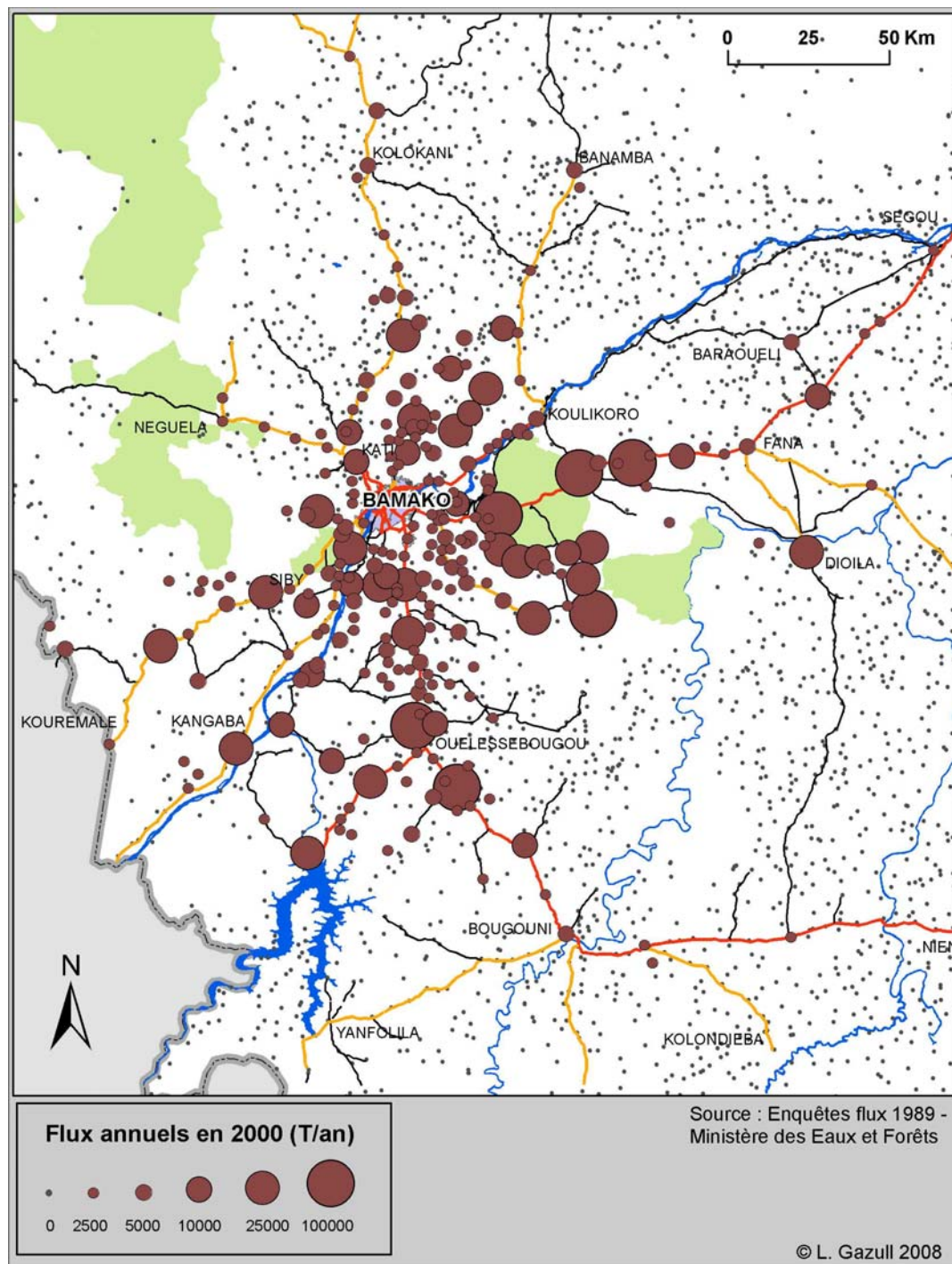
Les flux modélisés sont les flux agglomérés de bois et de charbon (cf carte 1). Nous n'avons pas fait la distinction entre ces deux produits et les flux de charbon sont ramenés en Tonnes eq. bois avec la correspondance : 1kg de charbon = 7 kg de bois. En effet, même si les filières diffèrent quelque peu, les préférences des acteurs seront considérées communes aux deux commerces.

1.3. Le modèle de régression de Poisson

Pour approcher les flux selon une formalisation de type gravitaire, nous avons utilisé le modèle de régression de Poisson introduit par Aitkin et Flowerdew (Aitkin et Flowerdew, 1982). Cette méthode est classiquement utilisée pour inférer des décomptes et a été largement éprouvée pour modéliser des flux de marchandises (Debie et Guerrero, 2008 ; D'aubigny *et al.*, 2000). Les flux sont alors assimilés à des chargements roulants qui se succèdent dans le temps. Cette méthode permet notamment de prendre en considération les flux nuls dans l'ajustement du modèle ce qui est ici le cas de nombreux villages non producteurs.

Dans le cas de l'application du modèle de Poisson à un échantillon de n sites de production, on fait l'hypothèse que les flux observés sont une réalisation $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ d'une variable aléatoire de loi de Poisson Y , à n composantes indépendamment distribuées, de paramètre $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_n)$, conditionnée par les variables explicatives X_1, X_2, \dots, X_p . Quant à la forme sous laquelle interviennent les variables explicatives, on retiendra une combinaison multiplicative de ces variables.

Mais le modèle de Poisson pose des problèmes lorsque les données comptent une forte proportion de zéros, ce qui correspond à notre cas d'étude (Allain et Brenac, 2001). Nous avons alors fait appel à un modèle de type quasi-Poisson qui introduit un paramètre de sur-dispersion décrivant la distorsion entre la variance et la moyenne (Zeileis *et al.*, 2008 ; Allain et Brenac, 2001). En pratique, le modèle quasi-Poisson aboutit à des estimateurs identiques à celui de Poisson, mais les écarts-types de ces estimateurs sont augmentés d'un facteur $t\frac{1}{2}$ par rapport aux écarts-types du modèle de Poisson. Il en résulte que des variables qui apparaissent abusivement significatives dans le modèle de Poisson, peuvent ne pas l'être dans le modèle plus juste de quasi-Poisson. L'ajustement du modèle et sa validation ont été effectués avec le logiciel GNU R et plus particulièrement avec la procédure GLM propre aux modèles linéaires généralisés.



Carte 1. Flux villageois enregistrés en janvier 2000, extrapolés à l'année.

2. Acteurs, préférences, entités spatiales et attributs retenus

2.1. Les acteurs modélisés

L'approvisionnement de Bamako est le fruit de l'activité d'un grand nombre d'acteurs aux rôles, intérêts et pratiques différents. Mais malgré la diversité des situations, un circuit commercial domine : la production de bois est assurée à plus de 99% par des bûcherons ruraux indépendants.

La coupe se fait dans les brousses et les jachères des villages. Une fois le bois coupé, conditionné en fagots ou carbonisé, celui-ci est acheminé par les producteurs sur des points de vente en milieu rural. Ces points de vente peuvent être individuels ou collectifs ; permanents (en bord de route ou dans un village) ou périodiques (en général les jours de marché ou de foires hebdomadaires). Ils sont visités par des commerçants urbains qui viennent collecter les produits (charbon et bois de feu) pour l'acheminer et le vendre en ville. Ces commerçants ne sont pas propriétaires de leur moyen de transport et ont recours à une location en ville pour effectuer leurs tournées. A l'entrée de la ville et sur le chemin du retour, les chargements sont contrôlés par l'administration forestière qui vérifie le paiement des taxes et distribue les amendes en cas de non respect des règles. Une fois en ville, le chargement est soit directement vendu aux consommateurs par le commerçant collecteur, soit revendu à des détaillants sur les marchés urbains ou en bord de rue.

La Figure 1 schématise cette chaîne d'approvisionnement majoritaire. Cette dernière est donc dominée par trois grands types d'acteurs : le producteur rural, le commerçant-collecteur urbain et l'agent du contrôle forestier.

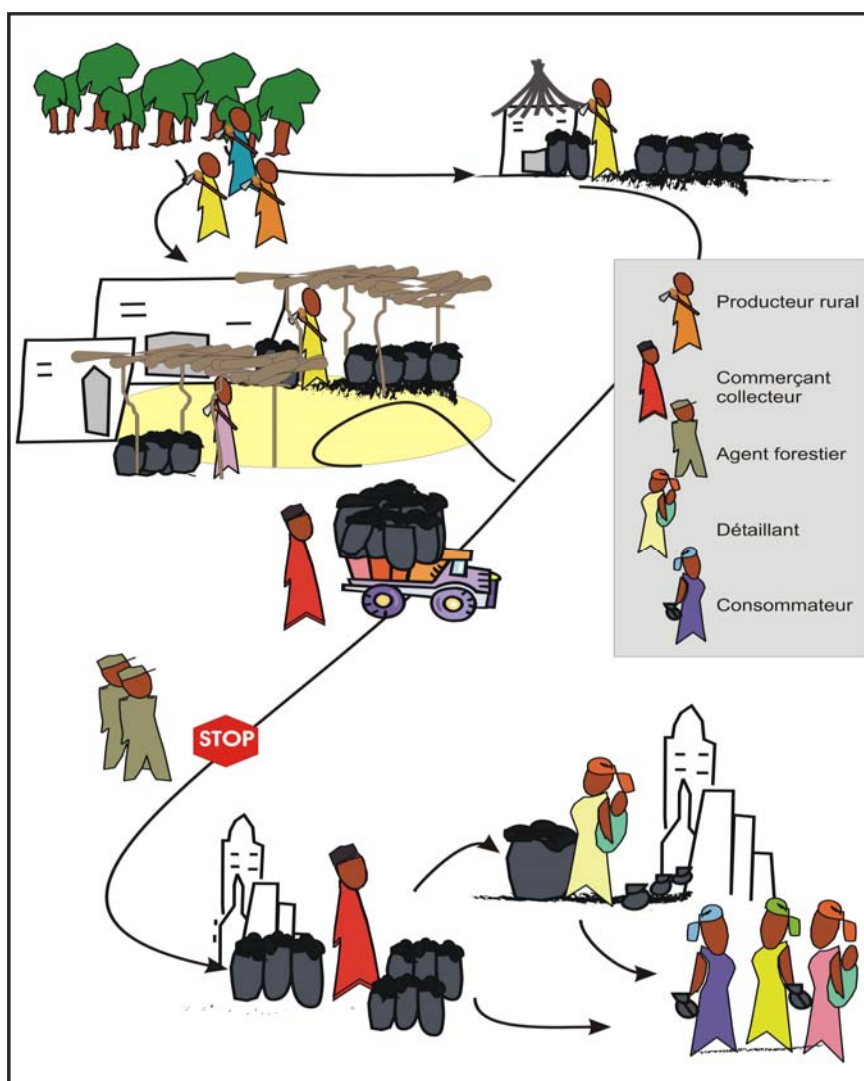


Figure 1. Schéma d'approvisionnement dominant de Bamako

L'analyse des préférences s'est attachée à caractériser et comprendre les comportements de ces trois types d'acteurs dans le contexte de la chaîne d'approvisionnement dominante décrite ci-dessus.

2.2. Les préférences déclarées des acteurs de la filière

2.2.1. Les préférences déclarées des producteurs ruraux

Des enquêtes auprès des producteurs, il ressort que les préférences sont, par ordre décroissant :

- un travail moins pénible. La pénibilité du travail conditionnerait directement l'intensité de l'activité et le choix des zones de coupe. Néanmoins, il convient de relativiser ce critère de pénibilité, car avant toute chose, c'est sans doute une demande de reconnaissance sociale et économique de la pénibilité qui s'exprime. L'organisation en structures coopératives agréées par l'Etat (les SRG) permet en partie d'obtenir cette reconnaissance sociale;
- des revenus « comme je veux, quand je veux ! ». L'activité de bûcheronnage ou de charbonnage se fait au gré des besoins financiers ponctuels et du temps laissé par les autres occupations. Ainsi, les femmes peuvent confectionner de petites meules de charbon ne brûlant que 3 à 4 jours, de manière à pouvoir écouler leur production sur le marché hebdomadaire local où elles se rendent également pour acheter leurs condiments pour la semaine;
- être visible du plus grand nombre de commerçants. L'écoulement des produits est un problème majeur pour les producteurs. Pour sortir d'une attitude passive vis-à-vis des commerçants et ainsi pouvoir vendre quand ils veulent et au meilleur prix, les producteurs cherchent à rendre leur production visible. Ils cherchent donc à la transporter au bord des axes routiers les plus fréquentés;

2.2.2. Les préférences déclarées des commerçants

Des enquêtes auprès des commerçants Bamakois, il ressort que les éléments de choix d'un site d'achat en milieu rural sont, par ordre décroissant :

- la connaissance du lieu d'achat (30% des réponses). La connaissance du lieu apparaît comme le critère principal de choix d'un site d'achat. Ce critère traduit la difficulté à explorer le bassin d'approvisionnement (rareté des moyens de transport) et les pratiques de fidélisation des producteurs - cf ci-après).
- la qualité des produits (30% des réponses). La qualité est, aux dires des commerçants, une exigence première des consommateurs. Néanmoins, Tous les produits, même de mauvaise qualité, sont vendus et valorisés par des usages divers. La qualité est donc avant tout un facteur de négociation des prix entre les consommateurs, les vendeurs urbains et les producteurs ruraux
- la distance et le prix du transport (16% des réponses) ;
- la quantité de produits sur le lieu d'achat (12% des réponses). L'assurance d'un point de vente disposant de quantités importantes de produits, minimise le risque de rentrer à vide. Une des façons de s'assurer cette quantité de produit est de fidéliser un petit nombre de producteurs dans des zones densément pourvues en ressource ou de fréquenter des sites d'achat regroupant de nombreux producteurs. La fréquentation croissante de foires hebdomadaires traduit en grande partie ce besoin.
- l'accessibilité du lieu d'achat (10% des réponses). Même si le bois-énergie n'est pas un produit soumis à des risques de casse, l'accessibilité est un facteur important de choix. Ce qui renforce l'attractivité des foires hebdomadaires qui, elles, se trouvent pratiquement toutes sur des pistes aisément praticables ;
- le prix des produits (1% des réponses). Bien que les différences de prix entre les sites d'approvisionnement sont notables, il semblerait que les marges commerciales soient encore suffisamment fortes pour ne pas faire de cet élément un facteur de choix essentiel.

2.2.3. Les préférences déclarées des agents forestiers

- limiter les coupes. La limitation des coupes fait partie du discours officiel du Ministère de l'Environnement. Elle se traduit chaque année par une interdiction des coupes de bois vert durant la période hivernale (de juin à janvier). « *La mesure est destinée à protéger nos forêts qui se réduisent d'année en année comme peau de chagrin* » (discours du Ministre de l'Environnement 2006).

- taxer plus. La majorité des forestiers juge que le bois n'est pas assez taxé sans que ne soit réellement défini le juste niveau de taxation. Mais cette demande reflète surtout le manque de moyens alloués aux services forestiers. Une stratégie pour compenser cette « faiblesse » des taxes a été, depuis ces cinq dernières années, de multiplier les postes de contrôle en bord de route de manière à taxer les agents les plus solvables : les commerçants ;
- limiter les déplacements. L'administration forestière n'a plus les moyens humains et matériels de se déplacer sur le terrain. Elle cherche donc à regrouper les producteurs comme les commerçants pour mieux pouvoir les contrôler.

2.3. Les comportements révélés : l'utilisation du jeu de rôle Djolibois

Comme rappelé ci-avant, pour appuyer nos observations directes et mieux révéler les comportements des acteurs, nous avons construit un jeu de rôle – Djolibois - simulant le fonctionnement du bassin d'approvisionnement. Trois séances de jeu, d'une journée entière chacune, ont été jouées. Chaque séance a regroupé 15 acteurs de la filière et 5 animateurs, soit près de 50 personnes sur les trois jours. Ces parties ont permis de tirer les enseignements suivants en matière de stratégies commerciales :

- La fidélisation des producteurs. C'est sans doute le comportement révélé le plus important du jeu. Pour le commerçant, la fidélisation répond à un objectif d'optimisation de son déplacement sur un faible nombre de sites où il est sûr de disposer de la quantité et de la qualité des produits dont il a besoin. Outre les irrégularités d'approvisionnement, la fidélisation permet également de limiter les variations de prix d'achat en réduisant la concurrence.
- Le regroupement des producteurs. Les producteurs sont conscients, notamment avec le développement des structures coopératives, qu'en se regroupant ils peuvent mieux imposer leurs prix et leurs conditions aux commerçants urbains. Les marchés ruraux comme les foires hebdomadaires offrent cette facilité. Cette demande peut même aboutir à une organisation commune des ventes orchestrée par un responsable des ventes qui négocie avec les commerçants, au nom des producteurs.
- La quête individuelle des commerçants. Les commerçants ont des comportements beaucoup plus individualistes que les producteurs. Si une certaine forme d'entraide existe sur les marchés de vente à Bamako, la collecte reste un acte individuel. La location à plusieurs d'un moyen de transport n'est pas une stratégie volontaire mais une contrainte subie.
- La visibilité des producteurs. La possibilité offerte aux producteurs de promouvoir leur produit en affichant leur prix leur ouvre la possibilité de toucher plus de commerçants et donc de sortir des liens de dépendance étroits que souvent les commerçants imposent ;
- Le peu de prise en compte du coût du transport. Djolibois a confirmé le manque de prise en compte du coût du transport dans les stratégies spatiales. En revanche, le temps de déplacement et les errements de certains joueurs à chercher désespérément des produits a joué un rôle beaucoup plus important dans leurs quêtes de bois.

A cette étape du processus de modélisation, en combinant préférences exprimées et préférences observées, nous avons pu dégager les faits stylisés expliquant le mieux les comportements des acteurs et la formation des flux. L'étape suivante a consisté à choisir les entités spatiales les plus pertinentes au regard de ces comportements, et à caractériser ces entités en termes d'émissivité et d'attractivité.

2.4. Les entités spatiales en interaction

L'exploitation à des fins commerciales se raisonne de plus en plus dans les limites de chaque village. Les conflits territoriaux entre villages voisins générés par la coupe du bois en attestent. De la même façon, les étrangers au village ont de plus en plus de mal à obtenir des autorisations de couper. Cette volonté de s'appropriier les ressources peut même aller jusqu'à créer des clivages au sein des villages, voire même jusqu'à l'exclusion de certains hameaux jugés non légitimes.

Au vu de cette appropriation croissante des ressources forestières au niveau villageois, le village apparaît comme un niveau d'agrégation pertinent pour exprimer les préférences des producteurs, comme celles des

commerçants. Exprimer les flux à ce niveau permet également de tirer partie des enquêtes flux réalisées par l'administration forestière en 1989, 1994 et 2000. Les villages que nous avons modélisés sont alors les villages de vente du bois-énergie, c'est-à-dire les villages dans lesquels les producteurs apportent leurs produits pour les mettre sur le marché et où les commerçants urbains viennent les collecter. Ce ne sont donc pas nécessairement des villages de production.

A l'autre bout de la chaîne d'interaction, s'est posé le problème de la représentation spatiale de la ville demandeuse. La ville est une composition de marchés urbains dont la position n'est sans doute pas sans impact sur les préférences spatiales des commerçants. Cependant, dans un premier temps, nous avons choisi de ne pas considérer ces niveaux infra-urbains, en grande partie car les enquêtes flux renseignent sur le village d'origine et sur l'axe d'entrée à Bamako, mais pas sur le marché urbain de destination.

Dans le premier modèle proposé, Bamako est donc considérée comme un marché unique et la demande est considérée comme non différenciée en son sein. Dans un second modèle, nous avons considéré les liens existants entre la position des destinations intra-urbaines supposées et les axes d'approvisionnements.

2.5. Les attributs des villages

Dans un premier temps, la demande étant supposée émaner d'un marché unique, le modèle d'interaction est un modèle gravitaire à origine unique, de type contraint par la demande. L'expression du modèle est avant tout une expression de l'attractivité des destinations à la fois pour les producteurs ruraux qui viennent y vendre, que pour les commerçants urbains qui viennent y acheter. Cette attractivité dépend d'attributs non spatiaux (ressource, population, type de points de vente) et d'attributs spatiaux (organisation spatiale, taille).

2.5.1. Attributs non spatiaux

Le choix de ces attributs a été effectué essentiellement en tenant compte des préférences exprimées et observées des acteurs, mais également en fonction des données disponibles et quantifiables.

- le stock de bois sur pied. Ce facteur rend compte de la quantité potentielle qu'un village peut produire. Il a été calculé pour chaque village par interprétation d'images satellitales. Ce facteur n'a pas d'unité, il est proportionnel à la biomasse présente du village mais, faute de mesures au sol, il ne peut être exprimé en Tonnes de bois.
- la population du village. Ce facteur rend compte à la fois de la force de travail disponible, donc de la quantité de production potentielle, et de la visibilité du lieu. En effet, plus un village est important, plus il a de chances d'être connu.
- la présence d'un marché rural de bois-énergie. Le marché rural est à la fois un lieu de vente organisé et un espace où les taxes sont moins élevées. Mais en contrepartie, ces espaces sont également plus contrôlés par l'administration. C'est donc à la fois un facteur d'attraction et de répulsion. Mais ce facteur d'attraction/répulsion devra être interprété avec précaution. En effet, les marchés ruraux ont été majoritairement mis en place dans des villages qui produisaient déjà énormément de bois. Il sera donc difficile de faire la part de ce qui est du ressort d'une forme d'organisation, d'une baisse des taxes et de la visibilité historique.
- le type de point de vente. Comme nous l'avons vu, le type d'organisation du point de vente est un élément déterminant de sa fréquentation, aussi bien par les commerçants que par les producteurs. Les points de vente ont été classifiés en quatre catégories : 0/ villages sans organisation particulière ; 1/ villages disposant d'un marché hebdomadaire local ; 2/ villages disposant d'une foire hebdomadaire accueillant des marchands forains bamakois ; 3/ villages périurbains disposant d'un marché quotidien.

2.5.2. Attributs spatiaux

Le choix de ces attributs a été effectué essentiellement en fonction des comportements spatiaux des commerçants et des producteurs.

- le nombre d'opportunités alternatives sur le trajet entre Bamako et le village de destination. Ce facteur est estimé par le nombre de villages rencontrés sur le trajet. Il rend compte des possibilités alternatives que le commerçant rencontre pendant son déplacement jusqu'au village de destination. Mais il rend compte également des possibilités qu'a le commerçant de trouver, pendant son trajet retour, de quoi

- le nombre de postes de contrôle forestier sur le trajet entre Bamako et le village de destination. Il rend compte des tracasseries qu'aura à rencontrer le commerçant. C'est donc a priori un facteur de répulsion.
- la distance à la route praticable la plus proche. Plus les producteurs sont près d'une route praticable et fréquentée, plus ils sont visibles des commerçants, et moins la mise sur le marché est pénible.

2.6. La métrique de la distance

Dans la plupart des modèles existants, comme dans le modèle de von Thünen, l'éloignement entre la ville et les zones de production est mesuré par le coût du transport.

En pratique, le coût du transport du bois se compose de trois éléments :

- un coût forfaitaire journalier de location du camion et de son chauffeur ;
- un coût proportionnel à la valeur monétaire du chargement. Le coût de transport du charbon de bois est ainsi 2,5 fois plus élevé que celui du bois ;
- un coût proportionnel à la distance et à l'accessibilité du site.

Sur le terrain, il est très difficile de faire la part de ces trois facteurs. Le coût du transport est donné par les transporteurs pour un site donné et ce coût intègre l'ensemble de ces trois éléments. Les enquêtes auprès des commerçants collecteurs mettent en évidence que le coût pondéral du transport de charbon est pratiquement le même quelle que soit la distance parcourue entre 100 et 300 km. Le coût forfaitaire journalier est donc très largement supérieur aux coûts proportionnels à la distance. Aussi, l'hypothèse d'un coût de transport variant linéairement avec la distance n'a pas été retenue.

A la notion de distance-coût, nous avons donc préféré celle de distance-temps. En effet, ce facteur apparaît comme un élément beaucoup plus déterminant des choix des commerçants. Les commerçants sont en majorité des commerçantes qui, comme toutes les femmes d'Afrique de l'Ouest, doivent assumer également les charges domestiques. Il leur est très difficile, voire interdit, de passer une nuit en brousse pour collecter le bois. La tournée de collecte doit donc être la plus courte possible dans le temps et doit nécessairement être faite dans la journée. Cette contrainte fixe les limites du voyage aller à environ 5,5 heures et détermine l'ensemble de choix des villages.

A partir de nos visites de terrain, et d'un chronométrage de nos trajets sur les différentes pistes et routes du bassin d'approvisionnement, nous avons attribué à chaque axe routier une vitesse moyenne de déplacement. Nous avons ensuite calculé pour chaque village le temps minimum pour rallier la capitale. Cette distance-temps présente également l'intérêt d'intégrer les difficultés d'accès aux villages.

3. Résultats du modèle

3.1. Validation d'un premier modèle canonique d'interaction

Dans un premier temps, nous avons souhaité éprouver un modèle d'interaction fidèle aux hypothèses communément admises dans la littérature. Nous avons, à cet effet, volontairement ignoré les attributs relatifs à l'organisation de la vente pour ne retenir que les attributs concernant l'éloignement, l'organisation spatiale, le stock et la force de travail. Le type de point de vente sera introduit dans un second temps pour mieux en mesurer les effets.

Le premier modèle canonique (N°1) que nous avons cherché à valider a ainsi la forme suivante :

$$F_j = k \cdot \text{Stock}_j^f \cdot \text{Pop}_j^g \cdot \exp(h \cdot \text{Nb_Ctrl}_j) \cdot \text{Nb_Opport}_j^l \cdot \text{D_Route}_j^m \cdot \text{D_BKO}_j^n$$

La variable à expliquer est F_j , flux de bois-énergie comptabilisé entre Bamako et un village j compris dans l'ensemble des villages situés à une distance-temps limite de 5.5 heures.

k, f, g, h, l, m, n sont les coefficients d'ajustement recherchés ;

$Stock_j$: Stock de bois de j ;

Pop_j : Population de j (au dernier recensement de 1998) ;

Nb_Ctrl_j : Nombre de postes de contrôle entre Bamako et j ;

Nb_Opport_j : Nombre de villages alternatifs entre Bamako et j ;

D_Route_j : Distance entre le village j et la route praticable la plus proche ;

D_BKO_j : Distance-temps entre Bamako et j .

Les résultats de l'ajustement du modèle Quasi Poisson sont consignés dans le Tableau 1. Pour notre échantillon de données, le coefficient de dispersion est égal à 3708. Nous sommes donc très nettement dans un cas de sur-dispersion et dans le cas d'une structure poissonnienne avec beaucoup de sites à moyenne faible (voir nulle), ce qui justifie l'usage d'un modèle Quasi Poisson. L'ajustement du modèle s'est fait selon une méthode de recherche exhaustive. Ainsi toutes les combinaisons possibles de variables ont été testées.

L'analyse détaillée des résultats montre :

- le fort poids des variables canoniques de « masse » qui caractérisent l'attractivité du village : le STOCK, et la POPulation. A elles deux, ces variables expliquent 48% de la variance (Pseudo $R^2 = 0.48$). Le flux est directement proportionnel au Stock et à la population (coefficients proches de 1) ;
- le fort poids de la distance. Selon le modèle, les flux sont inversement proportionnels au carré de la distance temps à Bamako (coefficient très proche de -2). Le choix de la distance-temps comme paramètre d'éloignement semble pertinent ;
- la quasi absence d'influence des attributs spatiaux exprimant les opportunités alternatives et le nombre de postes de contrôle : NB_CTRL et OPPORT. Leurs coefficients sont presque nuls et non significatifs ;
- le peu de poids de la distance à la route. Le coefficient est faible et la significativité statistique également.

En ne retenant que les trois attributs les plus significatifs, le modèle devient alors

$$F_j = 1.13.Stock_j^{0.99}.Pop_j^{1.06}.Dist_BKO_j^{-1.80}$$

(Pseudo $R^2 = 0.54$)

Modèle 1. Modèle canonique (N°1) d'interaction non segmenté

Mais ce modèle n'explique que 54% de la déviance des flux (Pseudo $R^2 = 0.54$), ce qui laisse penser que d'autres paramètres jouent de manière significative dans l'explication des flux.

3.2. La segmentation du modèle par types de points de vente et par axes

3.2.1. La prise en compte de l'organisation de la vente

La segmentation du modèle par type de point de vente s'est faite en introduisant une variable qualitative FACT_VENTE (0,1,2,3) dans le modèle précédent.

A ce facteur nous avons également ajouté le facteur Marché Rural (MARCH_RUR ou MR) qui renvoie à la fois au type d'organisation de la vente et à un faible niveau de taxation.

3.2.2. La segmentation par axe

Outre l'introduction dans le modèle d'un facteur FACT_AXE rappelant l'appartenance du village à un sous bassin d'approvisionnement, la segmentation par axe nécessite également de prendre en compte le lien étroit qui existe entre la localisation urbaine des commerçants et les axes d'approvisionnement. Pour prendre en compte cette segmentation spatiale, nous avons partagé Bamako en cinq destinations correspondant aux destinations privilégiées des cinq axes. Bamako n'est donc plus considérée comme une destination unique. A chaque village, selon l'axe auquel il se rattache, a été associée une des cinq destinations urbaines, considérant ainsi le déterminisme observé axe/marché de destination. Enfin, les distances-temps de chaque village à la ville ont été recalculées en tenant compte des nouvelles destinations.

3.3. Résultats d'un nouveau modèle segmenté et différencié selon le type de point de vente

L'introduction de ces nouveaux facteurs, améliore grandement le modèle qui explique alors 74% de la déviance des flux. Cela peut paraître encore faible mais, au vu des imprécisions sur les données, notamment sur les quantités et sur la localisation exacte, c'est très satisfaisant. Les nouveaux coefficients sont donnés dans le *Tableau 2* ci-après et les résidus spatialisés sont exprimés sur la carte 2.

Le nouveau modèle segmenté par axe et type de points de vente devient alors :

$$F_j = 4.6 \cdot \text{Stock}_j^{0.5} \cdot \text{Pop}_j^{0.55} \cdot \text{Aj}_{\text{Fact_Vente}} \cdot \text{Bj}_{\text{Fact_Axe}} \cdot 2^{\text{MR}} \cdot \text{Dist_BKO}_j^{-1.2}$$

(Pseudo R² = 0.74)

Modèle 2. Modèle d'interaction (N°2) segmenté par type de point de vente et par axe

Le coefficient du facteur Marché Rural est de 2 ce qui signifie que *toutes choses étant égales par ailleurs*, le fait d'être un Marché rural multiplie le flux par 2. Cependant, ce facteur « Marché Rural » est difficile à interpréter, car ont souvent été agréés « Marchés Ruraux » des villages dont l'activité était déjà très forte par rapport aux autres. Le facteur Marché Rural est donc également un facteur « d'antériorité de l'exploitation ».

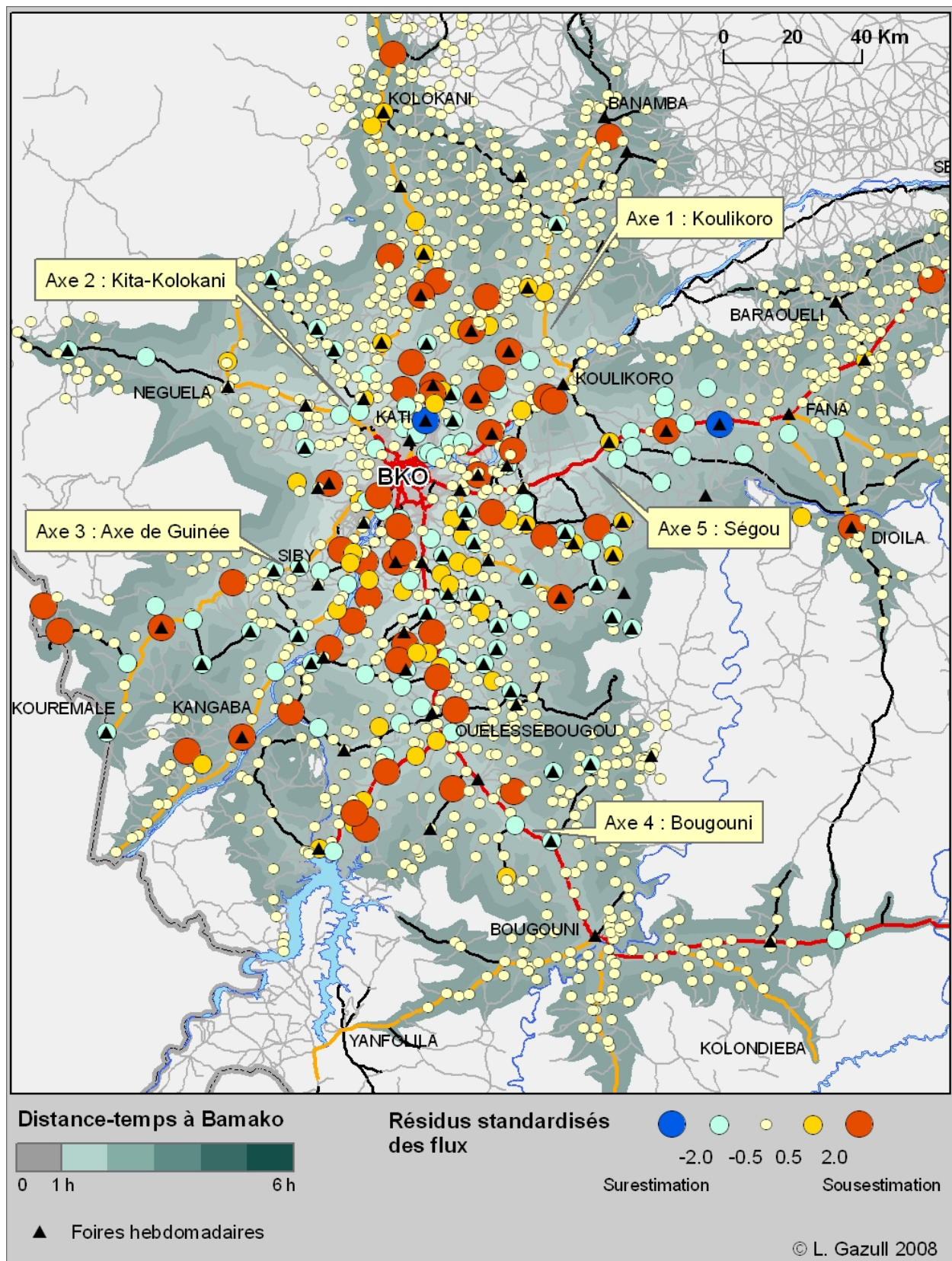
Les coefficients afférents au facteur FACT_VENTE (type de points de vente) sont respectivement de 1 pour les villages sans marchés (référence), et sont multipliés par 4.2 pour les marchés locaux (Type = 1), par 11.3 pour les foires hebdomadaires, et par 0.7 pour les villages périurbains disposant d'un marché quotidien. L'effet des foires est notable puisque *toutes choses étant égales par ailleurs*, le fait pour un village d'héberger une foire hebdomadaire multiplie le flux par plus de 10.

Les coefficients afférents au facteur AXE montrent que les axes 1 et 5 fonctionnent sensiblement de la même façon (coefficients égaux à 1). Les axes 3 et 4, quant à eux, comptent des coefficients environ 0.7 fois moins forts ($\exp(-0.37)$), ce qui signifie que *toutes choses étant égales par ailleurs*, un village situé sur l'axe 3 ou 4 produira 0.7 fois moins de bois que s'il était situé sur l'axe 1 ou 5. L'axe 2, de Kita-Kolokani, quant à lui, présente un coefficient de $\exp(-0.96)$, soit une diminution des flux d'un facteur de 2.6 par rapport aux axes 1 ou 5.

Enfin, la distance-temps exerce une friction plus faible sur les interactions que dans le modèle précédent. Le coefficient assigné à la distance-temps passe de -1.8 à -1.25, ce qui nous ramène à une décroissance des flux quasi proportionnelle à la distance.

Dans le détail, l'analyse des résidus met en évidence que :

- le modèle améliore les prévisions sur tous les axes, sauf sur l'axe 4. Sur ce dernier axe, les villages en bordure du fleuve Niger sont toujours victimes d'une sous-estimation quasi-systématique de leur production par le modèle ;
- la surestimation systématique des flux provenant des villages en périphérie immédiate de Bamako observée dans le premier modèle non segmenté a maintenant disparu. L'introduction d'une classe de point de vente « périurbain », caractérisée par la présence de marchés journaliers a permis de corriger ce biais.



Carte 2 : Résidus standardisés des flux 2000 selon le modèle 2 segmenté par axe

Variable		coefficient	Ecart type	z value	Pr(> z)	Signif
(Intercept)	k	2.78	1.00	2.78	0.01	**
LNSTOCK	f	0.97	0.06	15.33	< 2e-16	***
LNPOP	g	0.99	0.08	12.09	< 2e-16	***
NB_CTRL	h	0.04	0.05	0.80	0.42	
LNNB_OPPORT	l	0.30	0.26	1.13	0.26	
LNDIST_ROUTE	m	-0.11	0.04	-2.46	0.01	*
LNDIST_BKO	o	-1.97	0.28	-7.00	0.00	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tableau 1. Résultats de l'ajustement au modèle canonique N°1, par un modèle Quasi Poisson.

Variable	Coefficient	Effet	Ecart type	z value	Pr(> z)	Signif
(Intercept)	4.58		0.63	7.26	0.00	***
LNSTOCK	0.52		0.05	10.51	< 2e-16	***
LNPOP	0.55		0.07	8.32	< 2e-16	***
MARCH_RUR[T.0]	0.00	Ref (x1)				***
MARCH_RUR[T.1]	0.72	(x2)	0.12	5.77	0.00	***
FACT_VENTE[T.0]	0.00	Ref (x1)				***
FACT_VENTE[T.1]	1.44	(x4)	0.23	6.25	0.00	***
FACT_VENTE[T.2]	2.43	(x11)	0.15	16.02	< 2e-16	***
FACT_VENTE[T.3]	-0.38	(x0.7)	0.38	-1.00	0.32	
FACT_AXE[T.1]	0.00	Ref (x1)				***
FACT_AXE[T.2]	-0.96	(x0.4)	0.26	-3.68	0.00	***
FACT_AXE[T.3]	-0.40	(x0.7)	0.20	-2.00	0.05	*
FACT_AXE[T.4]	-0.37	(x0.7)	0.18	-2.05	0.04	*
FACT_AXE[T.5]	-0.04	(x1)	0.19	-0.21	0.83	
LNDIST_BKO	-1.25		0.10	-13.10	< 2e-16	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tableau 2. Résultats de l'ajustement au modèle N°2 segmenté selon les axes et les types de points de vente, par un modèle Quasi Poisson.

Conclusion

Il est souvent reproché aux modèles d'interaction spatiale, et aux modèles gravitaires en particulier, de ne pouvoir rendre compte des comportements individuels et de perdre ainsi en pouvoir explicatif (Pini, 1995). A ce type de critique, on peut aisément rétorquer que la seule prise en compte des logiques individuelles ne permet pas toujours de rendre compte des effets émergents d'un système, ce qui représente actuellement une des principales critiques des Systèmes Multi Agents. Un des enjeux actuels de la modélisation des interactions est, dans un sens, d'intégrer les règles de fonctionnement à des niveaux supérieurs dans les modèles de microsimulation et dans l'autre sens, de prendre en compte la diversité des décisions individuelles dans les modèles d'interaction spatiale.

La démarche de modélisation que nous avons retenue vise à replacer l'individu dans son rôle économique, et donc dans une logique de groupe social aux fonctions déterminées dans une chaîne d'approvisionnement, ainsi que dans un ensemble de formes spatiales (lieux et réseaux) qui définissent sa position et sa mobilité. Cette démarche part de l'hypothèse que les relations économiques entre des individus spatialisés ne peuvent s'appréhender qu'en considérant les organisations sociales (et dans notre cas la filière) et spatiales auxquels ils appartiennent. En construisant une analyse de l'objet économique et géographique qu'est le bassin d'approvisionnement, selon trois niveaux d'observation : spatial, socio-économique et individuel, nous avons pu ainsi faire émerger :

- les lieux pertinents d'échange ;
- les acteurs dominants de ces échanges ;
- leurs préférences individuelles ;
- les logiques de groupe (concurrence, collaboration) qui contraignent leurs comportements.

Cette démarche multiniveaux, de l'individu au groupe social, du lieu au réseau de lieux, permet de contrôler totalement le processus d'agrégation devant mener à la définition des entités spatiales en interaction et de leurs attributs modélisés. Le modèle d'interaction spatiale ainsi construit n'est plus une boîte noire dans laquelle on fait jouer des paramètres de masse statistiquement significatifs, mais correspond au reflet des comportements concrets des acteurs de la filière.

Outre la significativité des attributs retenus par rapport au fonctionnement de la filière, l'originalité du modèle développé, réside également dans la prise en compte de l'effet du type d'organisation des ventes : individuelle ou coordonnée. La présence d'une foire hebdomadaire ou d'un marché rural est notamment un facteur majeur d'attractivité, aussi bien pour les commerçants que pour les producteurs. Il peut expliquer à lui seul 60 % de la variance des flux. Ce facteur essentiel des interactions spatiales entre la ville demandeuse et les villages offrants, traduit le jeu des interactions sociales s'exerçant entre commerçants collecteurs et producteurs (jeux de pouvoir, fidélisation), mais également au sein du groupe des commerçants (concurrence), ou au sein des producteurs (coordination). Cette caractéristique de l'échange est négligée dans la plupart des modèles de localisation et en particulier dans celui de von Thünen. Ce dernier suppose en effet d'une part que les producteurs vendent directement leur production à la ville, et d'autre part qu'ils adoptent des démarches individuelles de maximisation de leur profit. Or, que ce soit pour les produits agricoles ou pour les produits de collecte (le bois, mais également les autres produits forestiers non ligneux), les chaînes d'approvisionnement sont constituées d'un grand nombre d'acteurs aux fonctions et aux intérêts divers. Entre producteurs et consommateurs, se succède une série d'intermédiaires assurant les fonctions de collecte, de transport, de stockage et distribution. Au sein de ces chaînes, se développent des forces sociales qui modifient les rapports entre les lieux et qu'il convient donc de considérer dans les modèles d'interaction spatiale. Dans le cas de l'approvisionnement de Bamako, les résultats mettent en évidence que les logiques de l'échange et que les relations entre groupes sociaux prennent le pas sur les coûts de déplacement.

Bibliographie

Aitkin, M. et Flowerdew, R. (1982). A Method of fitting the gravity model based on the Poisson distribution. *Journal of Regional Science*, 22 (2), 191-202.

- Allain, E. et Brenac, T. (2001). Modèles linéaires généralisés appliqués à l'étude des nombres d'accidents sur des sites routiers : le modèle de Poisson et ses extensions. *Recherche Transports Sécurité*, 72.
- Buttoud, G. (2001). *Gérer les forêts du sud*. Paris: L'harmattan.
- Chomitz, K. M. et Griffiths, C. (1997). *An economic analysis of woodfuel management in the Sahel: the case of Chad*. New York: World Bank.
- Cline-Cole, R. A., Main, H. A. et Nichol, J. E. (1990). On fuelwood Consumption, population dynamics and deforestation in africa. *World Development*, 18-avr, p. 513-527.
- D'aubigny, G., Calzada, C., Grasland, C., Robert, D., Viho, G. et Vincent, J.-M. (2000). Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale. *Cybergeo, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, URL: <http://www.cybergeo.eu/index4357.html>
- Debrie, J. et Guerrero, D. (2008). (Re)spatialiser la question portuaire : pour une lecture géographique des arrière-pays européens. *L'espace géographique*, 1 (37).
- ESMAP (2001). *Sustainable woodfuel supplies from the dry tropical woodlands*. ESMAP Technical Paper. New York: Energy Sector Management Assistance Programme - Joint UNDP/World Bank.
- Gazull, L., Gautier, D. et Becu, N. (2010). Usage d'un jeu de rôle pour l'analyse préalable d'un SIG participatif. *Revue Internationale de Géomatique*, 20/1, pp.7-36.
- Holm, E. et Sanders, L. (2001). *Modèles spatiaux de microsimulation*. Hermès.
- Pini, G. (1995). L'interaction spatiale. In *Encyclopédie de géographie* (Eds, Bailly, A., Ferras, R. and Pumain, D.). Paris: Economica.
- Ribot, J. C. (1990). *Markets, States and environmental policy: The political economy of charcoal in Senegal*. University of California.
- Zeileis, A., Kleiber, C. et Jackman, S. (2008). Regression Models for Count Data in R. *Journal of Statistical Software*, 27 (8).